

ORIGINAL ARTICLE

# 단조 및 반복하중 하에서의 모사 암석 시료의 임계하 균열성장 지수에 관한 연구

고태영\*

SK건설 TBM팀

## A Study on Subcritical Crack Growth Parameters in Rock-like Material under Monotonic and Cyclic Loading

Tae Young Ko\*

SK Engineering & Construction, TBM Team

\*Corresponding author: [tyko@sk.com](mailto:tyko@sk.com)

Received: April 22, 2019

Revised: April 25, 2019

Accepted: April 26, 2019

### ABSTRACT

Subcritical crack growth in rock material can occur under monotonic and cyclic loading. Subcritical crack growth plays an important role in evaluating the long-term stability of structures in rocks. This paper presents the results of studies conducted to determine subcritical crack growth parameters under monotonic and cyclic loading in rock-like material. The constant stress rate method was employed for monotonic loading. The subcritical crack growth parameter of  $n$  under cyclic loading was determined by the relation between the rate of crack growth per cycle and stress intensity factor range. The specimens contained pre-existing flaws with 45 and 60 degrees of inclination angle and flaws spacing and continuity were varied to arrange crack growth in shear or tensile manner. The results show that the parameter of  $n$  is almost constant regardless of the applied load conditions such as monotonic and cyclic or shear and tension.

**Keywords:** Subcritical cack growth, Monotonic, Cyclic, Shear, Tension

### 초록

암석에서의 임계하 균열성장은 단조 및 반복하중 하에서 일어날 수 있다. 임계하 균열 성장은 암반에 건설되는 지하구조물의 장기 안정성의 평가에 큰 영향을 미친다. 본 연구에서는 모사 암석 시료를 사용하여 단조 및 반복하중 하에서의 임계하 균열성장 지수를 구하였다. 단조하중 조건에서는 일정 응력 속도 법이 적용되었으며, 반복하중에 의한 임계하 균열성장 지수는 반복에 의한 균열성장 속도와 응력확대계수폭의 관계를 이용하였다. 연구에 사용된 시험편은 45°와 60°의 균열 경사각을 가지고 있으며, 균열의 간격 및 연속성에 변화를 주어 전단 또는 인장에 의한 균열성장이 가능하도록 하여 전단 또는 인장에 의한 임계하 균열성장 지수도 구하였다. 그 결과, 임계하 균열성장 지수  $n$ 은 작용하는 하중 조건, 즉 단조 및 반복하중, 혹은 전단 및 인장에 관계없이 거의 일정한 값을 나타내었다.

**핵심어:** 임계하 균열성장, 단조 하중, 반복 하중, 전단, 인장



## 1. 서론

암석은 여러 광물이 접촉하여 이루어져 있으며, 서로 다른 광물의 접합에 의해 공극과 균열 등을 가지게 된다. 이러한 암석 내의 공극과 균열은 작용하는 응력에 의해 성장하고 하나로 합쳐져서 궁극적으로 급작스러운 파괴(catastrophic failure)에 이르게 된다. 암석 내에 존재하는 공극과 균열의 성장과 결합에 의한 급작스러운 파괴는 선형파괴역학(linear fracture mechanics)으로 잘 설명될 수 있다. 선형파괴역학에서 균열의 성장은 작용하는 응력과 균열의 길이로 구해지는 응력확대계수(stress intensity factor)가 임계점에 도달할 때 일어나게 되며, 이때의 임계 응력확대계수를 파괴 인성(fracture toughness)이라고 한다.

그러나 임계점 이하의 응력에서도 균열은 성장할 수 있으며 이를 임계하 균열성장(subcritical crack growth)이라고 한다. 임계하 균열성장은 임계 이하의 응력이 장기간에 걸쳐 작용하거나, 임계 이하의 응력이 반복적으로 작용할 때 발생하며, 이는 주로 균열 주변의 수분에 의한 환경적인 요인에 의한 것이다(Swanson, 1984, Atkinson and Meredith, 1987, Ingraffea, 1987, Cox and Scholz, 1988).

임반에 건설되는 지하구조물은 지각의 구조력(tectonic force)를 지속해서 받으며, 지하수 유입 등으로 임계하 균열성장이 가능한 환경을 가지고 있다. 특히 방사성 폐기물 처분장, CO<sub>2</sub> 지중저장, 압축공기 에너지 지하저장과 같은 지하구조물은 장기적인 안정성 평가가 매우 중요하며, 이러한 장기적인 안정성에 영향을 줄 수 있는 주요한 요인 중의 하나는 임계하 균열성장이다(Ko et al., 2008, Ko and Kemeny, 2011, Jung et al., 2014).

단조 하중에서의 임계하 균열성장은 Charles(1958)가 제안한 멱함수의 식으로 다음의 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\frac{da}{dt} = A_1 K^{n_1} \quad (1)$$

여기서,  $a$ 는 균열의 길이,  $t$ 는 시간,  $da/dt$ 는 임계하 균열성장 속도,  $K$ 는 응력확대계수,  $A_1$ 과  $n_1$ 은 임계하 균열성장지수(subcritical crack growth parameters)이다.

Paris and Erdogan(1963)은 반복하중에 의한 임계하 균열성장을 식 (2)와 같이 나타내었다.

$$\frac{da}{dN} = A_2 (\Delta K)^{n_2} \quad (2)$$

여기서,  $a$ 는 균열의 길이,  $N$ 은 하중반복 횟수,  $da/dN$ 은 반복 하중에 의한 균열성장 속도,  $\Delta K$ 는 응력확대계수폭,  $A_2$ 와  $n_2$ 는 반복 하중에서의 임계하 균열성장지수이다.

임계하 균열성장은 응력에 의한 영향보다는 환경적인 요인에 의해서 더 크게 영향을 받기 때문에 하중 조건은 다르지만, 식 (1)과 (2)의 임계하 균열성장지수는 서로 연관이 되어 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 실험적인 방법에 따라 두 개의 균열을 가지는 모사암석 시료인 석고 시멘트 시험편의 단조 및 반복하중 조건에서의 임계하 균열성장지수를 구하고, 특히 지수  $n$ 이 각각의 하중 조건에 따라 어떻게 다른지를 살펴보고자 한다. 석고 시멘트는 양생기간이 짧아서 비교적 짧은 시간에 많은 시험편을 만들 수 있는 장점이 있으며, 응력-변형률의 관계가 암석과 유사한 것으로 알려져 있다(Bobet, 1997). 단조 하중에 의한 임계하 균열성장지수의 결정은 일정 응력 속도법(constant stress rate method)을 사용하였으며(Ko and Kemeny, 2011), 반복하중에 의한 임계하 균

열성장 지수의 결정은 시험편에서 균열이 성장하여 파괴될 때까지 반복 하중을 가하여 측정하였다. 45°와 60°의 균열 경사각을 사용하였으며, 균열의 간격 및 연속성에 변화를 주어 전단 또는 인장에 의한 균열성장이 가능하도록 균열을 배치하여 전단 또는 인장에 의한 임계하 균열성장 지수도 구하였다.

## 2. 시험편 제작 및 시험 방법

### 2.1 시험편의 제작

본 연구에 사용된 재료는 석고 혼합물로, 석고 시멘트(Hydrocal B-11, U.S. Gypsum Company 제조), 규조토(Dicalite, Grefco 제조), 그리고 물을 섞어서 만들었다. 사용된 각 재료의 중량비는 물/석고=0.4, 물/규조토=35.0이며, 사용량은 석고 시멘트 560 g, 물 224 cc, 규조토 6.4 g이다. 이 재료를 교반기에 넣고 4분간 교반 한 후 너비 12.7 mm, 두께 0.1 mm의 가는 철판이 설치된 성형틀에 붓는다. 성형틀을 진동 테이블 위에 올려 2분 동안 진동을 가하여 교반 중에 생긴 공기 방울을 제거하였다. 대략 1시간 뒤 시험편이 굳어지고 나면, 철판을 제거하고 하루 동안 건조했다. 그 뒤 시험편의 표면을 연마하여 높이 152.4 mm, 너비 76.2 mm, 두께 30 mm의 크기로 만들고, 온도 40°C의 건조기에 넣어 4일 동안 양생한 후 시험하였다. 시험편의 형상은 ‘균열의 경사각( $\beta$ )-간격(s)-연속성(c)’의 형태로 나타내며 간격, 연속성, 암석 브릿지(rock bridge) 길이( $l$ ) 등의 크기는 균열의 절반 길이인  $a$ 의 배수로 나타낸다(Fig. 1). 본 연구에서 사용된 시험편의 형상 및 암석 브릿지 길이는 Table 1에 나타내었으며, 시험편의 형상을 Fig. 2에 나타내었다.

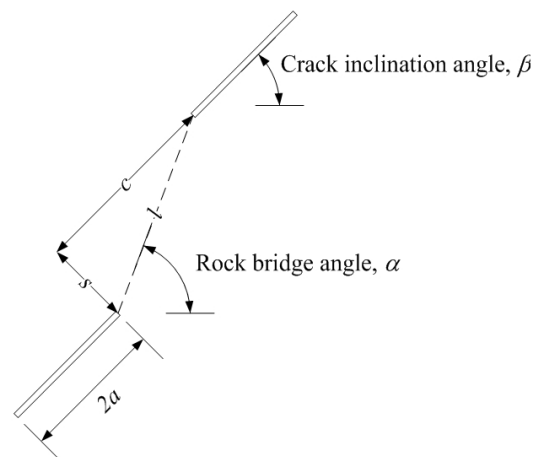


Fig. 1. Schematic configuration of specimen geometry

Table 1. Specimen geometry used in this study

Geometry	Rock bridge length [mm]	Rock bridge angle [°]
Coplanar	45-0-2a	12.70
	60-0-2a	12.70
Non coplanar	45-a-a	8.95
	45-2a-2a	17.97

## 2.2 시험편의 물성

균열이 없는 시험편의 일축압축강도(uniaxial compressive strength)는 34.8 MPa, 인장강도(tensile strength)는 3.2 MPa, 탄성계수(elastic modulus)는 5.9 GPa, 그리고 푸아송 비(Poisson's ratio)는 0.15로 측정되었다.

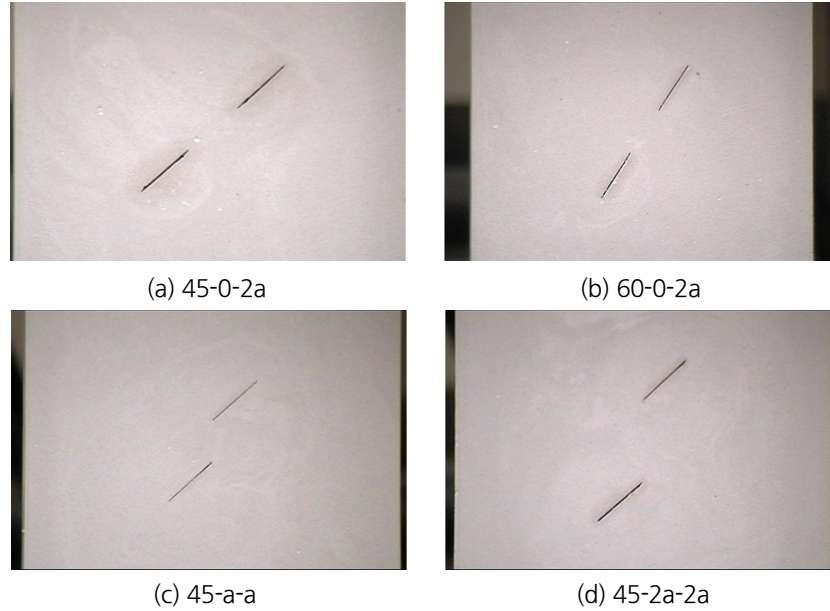


Fig. 2. Specimen geometry

## 2.3 시험 방법

### 2.3.1 일정 응력 속도법에 의한 단조 하중에서의 임계하 균열성장 지수 측정

일정 응력 속도법에 의한 임계하 균열성장 지수 측정은 서로 다른 응력 속도에서 시험편의 파괴 강도를 구하고 응력 속도와 파괴 강도 사이의 관계를 이용하여 지수를 측정하는 방법이다. 식 (1)과 일반화된 응력확대계수의 식 (3)으로부터 다음의 식 (4)와 같은 파괴강도와 임계하 균열성장지수의 관계를 유도할 수 있다(Ko and Kemeny, 2013).

$$K = Y\sigma\sqrt{a} \quad (3)$$

여기서,  $Y$ 는 일반화된 응력확대계수의 형상계수이다.

$$\log\sigma_f = \frac{1}{n_1 + 1} \log\dot{\sigma} + \log D \quad (4)$$

여기서,  $\sigma_f$ 는 파괴강도,  $\dot{\sigma}$ 는 응력속도이고,  $\log D$ 는 식 (5)와 같다.

$$\log D = \frac{1}{n_1 + 1} \log \left( \frac{2K_c^2(n+1)}{A_1 Y^2(n-2)} \right) \sigma_i^{n-2} \quad (5)$$

여기서,  $K_c$ 는 파괴인성,  $\sigma_i$ 는 비활성 강도(inert strength)로 임계하 균열성장이 일어나지 않는 아주 빠른 하중속도 혹은 비활성 조건에서 구한 강도이다.

본 연구에서는 0.02 MPa/s와 50 MPa/s의 두 가지의 응력속도가 사용되었으며, 각각의 응력속도에 대해 시험편의 종류마다 2~3회의 일축압축시험이 시행되어 임계하 균열성장지수  $n_1$ 을 구하였다. 시험편의 형태에 따른 응력확대계수의 형상계수와 파괴인성을 본 연구에서는 구하지 않아서, 임계하 균열성장 지수  $A$ 도 역시 구하지 않았다.

### 2.3.2 반복 하중에 의한 임계하 균열성장지수 측정

반복 하중 시험에서 사용된 재하 주파수는 1초당 0.5번인 0.5 Hz이었으며, 이는 대략 83.82 mm/min의 하중속도를 가지는 것으로 측정되었다. 반복하중의 최소값은 0.18 MPa로 고정시켜서 시험편은 항상 압축응력을 받도록 하여 가압판이 시험편으로부터 분리되는 것을 방지하였다. 반복하중의 최대값은 균열의 배치 형태마다 다르며, 동적 강도의 90%, 85%, 80%의 값을 사용하였다. 시험에 사용된 모든 균열 배치 형태에 대하여 50 MPa/s의 하중속도에서 측정된 시험편의 파괴 강도를 3회에 걸쳐 측정하여 이들의 평균값을 동적 강도로 사용하였다.

시험과정은 모두 디지털 캠코더에 의해서 녹화되었으며, 비디오 분석을 통해 균열의 시작, 결합 그리고 파괴될 때까지의 하중반복횟수 등을 측정하였다. 반복 하중 시험은 시험편이 파괴될 때까지 혹은 하중반복횟수가 4000회까지만 실행되었다.

식 (2)의 양변에 로그를 취하면 다음의 식 (6)과 같다.

$$\log \frac{da}{dN} = \log A_2 + n_2 \log \Delta K \quad (6)$$

반복 하중에서의 균열성장 속도와 응력확대계수폭을 로그눈금의 그래프로 표현하고 선형회귀에 의해 직선을 구하면, 기울기는  $n_2$ 에 해당하고, 절편은  $\log A_2$ 에 해당하므로 임계하 균열성장 지수를 결정할 수 있다.

## 3. 시험 결과 및 분석

동일한 선상에 균열을 갖는 시험편은 “45-0-2a”와 “60-0-2a”로 단조 및 반복 하중 시험 모두에서 전단에 의한 균열이 먼저 암석 브릿지에서 성장하고 그 이후 외부로의 날개균열이 성장하여 시험편이 파괴되었다. 동일한 선상에 균열을 갖지 않고 암석 브릿지 길이만큼 떨어져 있는 시험편인 “45-a-a”와 “45-2a-2a”에서는 단조 및 반복 하중 시험 모두에서 인장 균열인 날개 균열(wing crack)이 먼저 암석 브릿지에서 성장하여 결합되고 이후에 외부로의 날개균열이 성장하여 시험편이 파괴되었다. 균열이 성장 한 후의 시험편의 형태를 Fig. 3에 나타내었다.

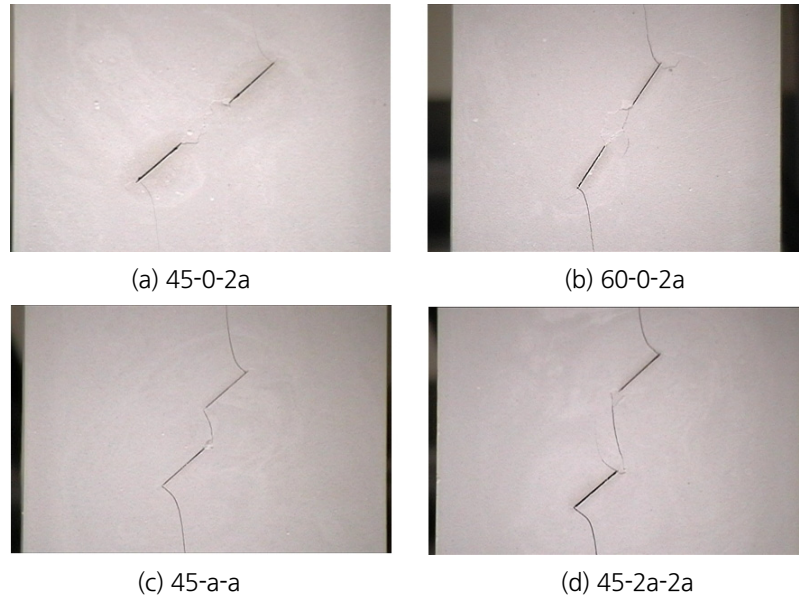


Fig. 3. Specimen geometry after crack growth

반복 하중에서의 임계하 균열성장 지수를 구하기 위해서는 식 (6)과 같이 각각의 시험편 형상에 대한 응력확대계수의 식이 필요하게 된다.

전단에 의한 균열이 발생한 시험편에 대해서는 전단균열모형(shear crack model)을 이용하여 응력확대계수의 식을 구하였다. 전단균열모형은 Fig. 4(a)와 같으며, 균열의 성장방향은 균열의 방향과 같다고 가정을 한다. 응력확대계수의 식은 다음과 같이 표현된다.

$$K = \tau^* \sqrt{\pi a} \quad (7)$$

여기서,  $a$ 는 균열의 절반길이,  $\tau^*$ 는 유효전단응력으로 다음의 식 (8)과 같다.

$$\tau^* = \sigma_1 (\sin\beta \cos\beta - \mu \cos^2\beta) - \sigma_3 (\sin\beta \cos\beta + \mu \sin^2\beta) \quad (8)$$

여기서,  $\beta$ 는 균열의 경사각,  $\mu$ 는 균열면 사이의 마찰계수이다. 본 연구에서는 일축압축하중을 사용하였고, 열린 균열을 사용하였기 때문에 식 (7)은 아래의 식 (9)와 같이 간단히 정리할 수 있으며, 식 (7)의 응력확대계수의 식은 식 (10)과 같이 유도된다.

$$\tau^* = \sigma_1 (\sin\beta \cos\beta) \quad (9)$$

$$K = \sigma_1 (\sin\beta \cos\beta) \sqrt{\pi a} \quad (10)$$

인장에 의해 균열이 발생한 시험편에 대해서는 활주균열모형(sliding crack model)을 이용하여 응력확대계수의 식을 구하였다.

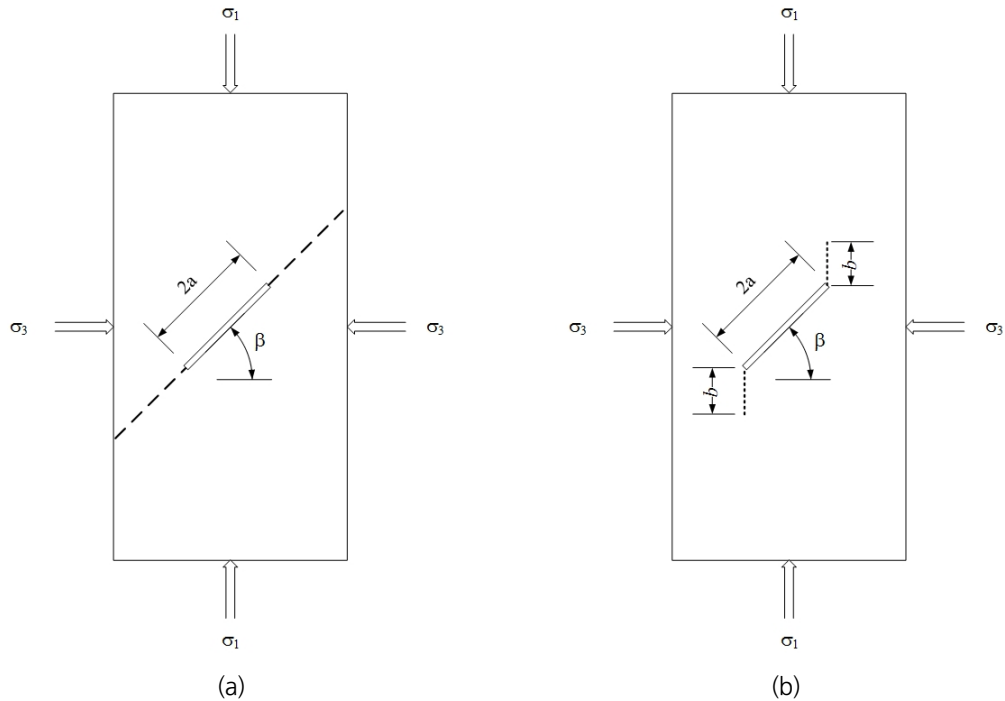


Fig. 4. Schematic illustration of the crack model: (a) shear crack model; (b) sliding crack model

활주균열모형은 압축하중 하에서 경사각을 가진 균열의 선단에서 발생하는 날개 균열에 대한 모형이며(Fig. 4(b)) 곡선형태로 성장하는 날개균열을 직선 형태로 단순화한 것으로, Ashby and Hallam(1986), Kemeny and Cook(1987) 등이 응력확대계수의 식을 제안하였다. 본 연구에서는 Kemeny and Cook(1987)이 제안한 식을 이용하였으며, 응력확대계수의 식은 다음의 식 (11)과 같다.

$$K = \frac{2a\tau^* \cos\beta}{\sqrt{\pi b}} - \sigma_3 \sqrt{\pi b} \tag{11}$$

여기서, b는 날개균열의 길이이다. 본 연구에서는 일축압축하중만이 사용되었고, 유효전단응력인 식 (8)을 이용하면 식 (11)은 다음과 같이 간단히 표현될 수 있다.

$$K = \frac{2a\sigma_1 \sin\beta \cos^2\beta}{\sqrt{\pi b}} \tag{12}$$

이상에서 언급된 전단균열모형 및 활주균열모형의 응력확대계수 식은 하나의 균열에 적용되는 것으로, 두 개의 균열의 상호작용은 고려하지 않는다. 본 연구에서 적용된 시험편은 두 개의 균열을 포함하지만, 균열의 길이 절반 이상의 거리를 두고 떨어져 있으며, 원래의 균열 선단에서 새로운 균열이 성장하는 순간에는 떨어져 있는 균열에 의한 영향이 미미할 것으로 판단되어 식 (9)와 (11)이 두 개의 균열을 갖는 조건에서도 유효하다고 가정하여 사용하였다.

### 3.1 단조 하중에서의 임계하 균열성장 지수

0.02 MPa/s의 하중속도에서의 파괴강도는 두 개의 균열이 성장하여 하나로 결합될 때의 압축강도를 사용하였다. “45-0-2a”와 “60-0-2a” 시험편에서는 전단에 의해 암석 브릿지가 결합될 때의 일축압축강도를 파괴강도로 가정하였고, “45-a-a”와 “45-2a-2a” 시험편에서는 날개균열에 의해 암석 브릿지가 결합될 때의 일축압축강도를 파괴강도로 가정하였다. 50 MPa/s의 하중속도에서의 파괴강도는 시험편의 파괴가 너무 짧은 순간에 발생하여 균열이 결합되고 완전히 파괴될 때의 강도의 차이를 구별할 수 없어서, 시험편이 완전히 파괴되었을 때의 일축압축강도를 사용하였다. 0.02 MPa/s의 하중속도에 대한 압축강도 시험은 2회 실시하였으며, 50 MPa/s의 하중속도에 대한 압축강도 시험은 3회 실시하였다. 각각의 시험편에 대한 단조 하중에 의한 파괴 강도와 하중속도를 Fig. 5와 같이 로그-로그의 그래프로 나타내고, 선형회귀에 의해 기울기를 구하였다. 전단에 의한 파괴가 일어난 “45-0-2a”, “60-0-2a” 시험편에서의 임계하 균열성장 지수  $n_1$ 은 각각 34와 36으로 평균 35이고, 인장에 의해 파괴가 일어난 “45-a-a”, “45-2a-2a” 시험편에서의 임계하 균열성장 지수  $n_1$ 은 각각 30과 37이었으며, 평균 33으로 전단에 의한 임계하 균열성장 지수와 유사하였다.

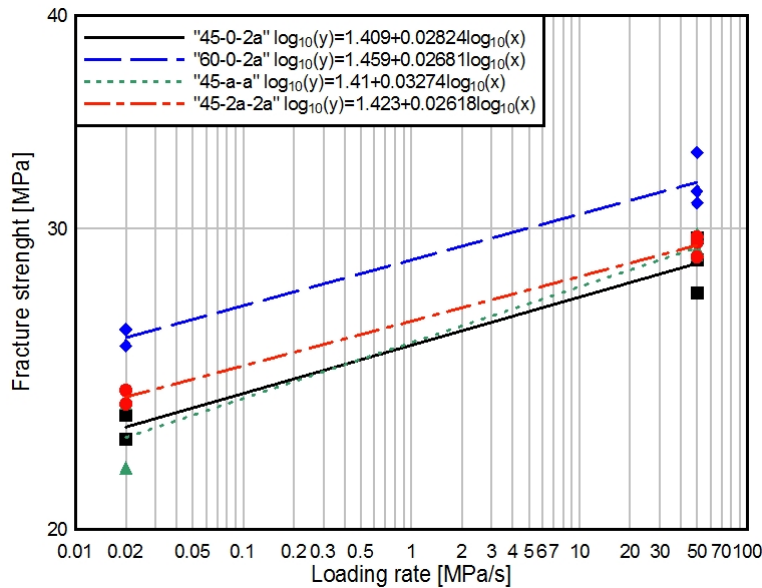


Fig. 5. Results of constant stress rate tests under monotonic loading

### 3.2 반복 하중에서의 임계하 균열성장 지수

각각의 시험편에 반복하중의 최대값은 동적 강도의 90%, 85%, 80%의 값을 적용하였으며, Fig.6과 같이 균열성장 속도와 응력 확대계수폭을 로그-로그의 그래프로 표현하고 선형회귀에 의한 직선의 기울기를 구하였다. 전단 파괴가 일어난 “45-0-2a”, “60-0-2a” 시험편에서의 임계하 균열성장 지수  $n_2$ 는 각각 31과 37로 평균 34이었으며, 인장 파괴가 일어난 “45-a-a”, “45-2a-2a” 시험편에서의 임계하 균열성장 지수  $n_2$ 는 각각 34와 37이었으며, 평균 35로 전단에 의한 임계하 균열성장 지수와 유사하였다.



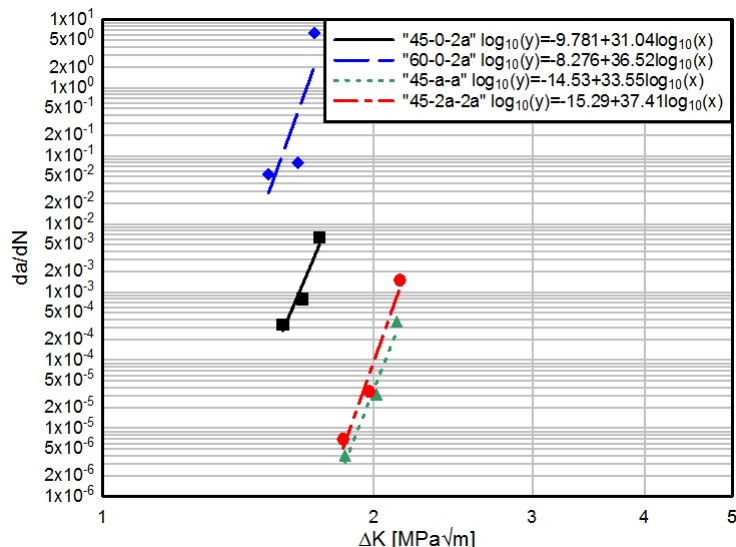


Fig. 6. Variation of the crack growth da/dN as a function of the stress intensity factor range ΔK

### 4. 토의 및 고찰

Ko and Kemeny(2013)에 의하면 일정 응력 속도법에 의한 시험에는 4개의 서로 다른 응력속도와 각 응력속도마다 10개의 시험을 추천하였다. 그러나 본 연구에서는 2개의 응력속도와 응력속도별 2~3개의 시험이 시행되었는데 이는 석고 혼합물로 만든 모사 압석 시료를 사용하여 동일한 제작과정을 통해 제작된 각 시험편에 대한 강도의 변이가 적을 것으로 판단하였기 때문이다.

각각의 시험편에 대한 단조 및 반복하중에 의한 임계하 균열성장 지수를 다음의 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Experiment results

Geometry	Failure mode	Subcritical crack growth parameter	
		Monotonic load	Cyclic load
45-0-2a	Shear	34	31
45-0-3a		36	37
45-a-a	Tension	30	34
45-2a-2a		37	37

임계하 균열성장 지수는 하중 조건에 따라 30~37 사이의 값으로 나타났다. 단조하중에 의한 임계하 균열성장 지수  $n_1$ 의 평균은 34로 나타났고, 반복하중에 의한 임계하 균열성장 지수  $n_2$ 의 평균값은 35로 서로 유사한 값을 가지는 것으로 나타났다. 전단에 의한 임계하 균열성장 지수  $n$ 의 평균값은 35이었으며, 인장에 의한 임계하 균열성장 지수  $n$ 의 평균은 35로 나타나 서로 동일한 값을 가지는 것으로 나타났다. 즉, 약간의 편차는 있지만, 대체적으로 하중 조건과 관계없이 임계하 균열성장 지수의 값은 서로 유사한 것으로 나타났다. 이는 임계하 균열성장이 하중에 의해 기인하기 보다는 수분에 의한 환경적 요인에 기인한 것이 더 큰 영향을 미치기 때문으로 판단된다.

Atkinson(1984)에 의하면, 임계하 균열성장의 주요 원인은 응력부식(stress corrosion), 용해(dissolution), 확산(diffusion), 이온교환(ion exchange), 그리고 미소소성(microplasticity)이며 암석 내 공극수의 화학적 영향에 의한 것으로 알려져 있다, 이들 중 특히 응력부식이 암석에서의 임계하 균열성장에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있는데, Si-O-Si 결합이 물에 의해 하나의 Si 원자에 수산기(OH)가 연결되는 결합구조(Si-OH)로 바뀌게 되어 결합 강도가 약해지게 된다. 균열선단과 이러한 환경적인 영향은 작용하중 보다는 얼마만큼 더 오랜 시간동안 환경적인 요인에 노출되었는지가 더 중요하기 때문에 하중 조건에 관계없이 임계하 균열성장 지수의 값은 서로 유사한 것으로 판단된다.

본 연구에서 얻은 결과와 유사한 결과를 다른 연구에서도 발견할 수 있었다. Ko(2008)와 Ko et al.(2017)은 코코니노(Coconino) 사암에 대해서 전단 및 인장하중 하에서의 임계하 균열성장 지수가 서로 유사하다는 것을 제시하였고, Hashiba et al.(2006)은 서로 다른 암종에 대한 압축 및 인장 강도 시험에서 같은 암종의 경우 시험의 방법에 관계없이 임계하 균열성장 지수가 서로 유사하다는 것을 나타냈다. 또한, Cheon and Jung(2017)은 정적과 동적 장기강도 시험에서 얻어진 미소파괴음 히트 누적곡선의 기울기 값과 지연파괴시간을 로그-로그 그래프로 표시하였는데, 기울기 값이 정적 및 동적 그리고 인장과 전단에 관계없이 서로 유사함을 발견 하였으며, 이 기울기는 임계하 균열성장 지수와 연관이 있다.

이상의 결과로부터 임계하 균열성장 지수는 하중조건에 관계없이 일정하며, 암석의 종류에 따라 달라지는 물질 상수의 하나로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 모사 암석 시료를 사용하여 단조 및 반복하중 하에서의 임계하 균열성장 지수를 구하였다. 단조하중 조건에서는 일정 응력 속도법이 적용되었으며, 반복하중에 의한 임계하 균열성장 지수는 반복에 의한 균열성장 속도와 응력확대계수폭의 관계를 이용하였다. 연구에 사용된 시험편은 45°와 60°의 균열 경사각을 가지고 있으며, 균열의 간격 및 연속성에 변화를 주어 전단 또는 인장에 의한 균열성장이 가능하도록 하여 전단 또는 인장에 의한 임계하 균열성장 지수도 구하였다. 본 연구를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 단조 하중에 의한 임계하 균열성장의 경우, 전단에 의한 파괴가 일어난 “45-0-2a”, “60-0-2a” 시험편에서의 임계하 균열성장 지수는 각각 34와 36으로 평균 35이고, 인장에 의해 파괴가 일어난 “45-a-a”, “45-2a-2a” 시험편에서의 임계하 균열성장 지수는 각각 30과 37이었으며 평균 33으로, 전단과 인장에 의한 임계하 균열성장 지수가 서로 유사하였다.
- 2) 반복 하중에 의한 임계하 균열성장의 경우, 전단 파괴가 일어난 “45-0-2a”, “60-0-2a” 시험편에서의 임계하 균열성장 지수는 각각 31과 37로 평균 34이었으며, 인장 파괴가 일어난 “45-a-a”, “45-2a-2a” 시험편에서의 임계하 균열성장 지수는 각각 34와 37이었으며 평균 35로, 전단과 인장에 의한 임계하 균열성장 지수가 서로 유사하였다.
- 3) 약간의 편차는 있지만 대체적으로 하중 조건과 관계없이 임계하 균열성장 지수의 값은 서로 유사한 것으로 나타났다. 이는 임계하 균열성장이 하중에 의해 기인하기 보다는 수분에 의한 환경적 요인에 기인한 것이 더 큰 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다.
- 4) 이상의 결과로부터 임계하 균열성장 지수는 하중조건에 관계없이 일정하며, 암석의 종류에 따라 달라지는 물질 상수의 하나로 판단된다.

## REFERENCES

- Ashby, M.F. and S.D. Hallam, 1986, The failure of brittle solids containing small cracks under compressive stress states, *Acta Metal.* 34.3, 497-510.
- Atkinson, B.K., 1984, Subcritical crack growth in geological materials, *J. Geophys. Res.* 89.B6, 4,077-4,114.
- Atkinson, B.K. and P.C. Meredith, 1987, The theory of subcritical crack growth with applications to minerals and rocks. In: *Fracture Mechanics of Rock*, Academic Press, London, 111p.
- Bobet, A., 1997, *Fracture Coalescence in Rock Materials: Experimental Observations and Numerical Predictions*. Sc. D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, U.S.A.
- Charles, R.J., 1958, Static fatigue of glass, *J. Appl. Phys.* 29.11, 1,549-1,560.
- Cheon, D.S. and Y.B. Jung, 2017, Analysis of acoustic emission signals during long-term strength tests of brittle materials, *Tunnel & Underground Space* 27.3, 121-131.
- Cox, S.J.D. and C.H. Scholz, 1988, Rupture initiation in shear fracture of rocks: an experimental study, *J. Geophys. Res.* 93, 4,920-4,938.
- Hashiba, K., S. Okubo, and K. Fukui, 2006, A new testing method for investigating the loading rate dependency of peak and residual rock strength, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 43, 894-904.
- Ingraffea, A.R., 1987, Theory of crack initiation and propagation in rock. In: *Fracture Mechanics of Rock*, Academic Press, London, 76p.
- Jung Y.B, D.S. Cheon, E.S. Park, C. Part, Y.S. Lee, C.W. Park, and B.H. Choi, 2014, Estimation of the characteristics of delayed failure and long-term strength of granite by brazilian disc test, *Tunnel & Underground Space* 24.1, 67-80.
- Kemeny, J.M. and N.G.W. Cook, 1987, Crack models for the failure of rock under compression, *Proc. 2nd Int. Conference Constitutive Laws for Engineering Materials, Theory and Applications*, Tucson, Arizona, Vol. 1, 879-887.
- Ko, T.Y., 2008, Subcritical crack growth under Mode I, II and III loading for Coconino sandstone. Ph.D. Thesis, University of Arizona, Tucson, U.S.A.
- Ko, T.Y, J. Kemeny, and H.K. Moon, 2008, Determination of subcritical crack growth parameters using double torsion test, *Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering* 45.6, 610-609.
- Ko, T.Y. and J. Kemeny, 2011, Subcritical crack growth in rocks under shear loading. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 116. B1, B01407.
- Ko, T.Y. and J. Kemeny, 2013, Determination of the subcritical crack growth parameters in rocks using the constant stress-rate test. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 59, 166-178.
- Ko, T.Y, J. Kemeny, and S.W. Jeon, 2017, Loading rate dependency of strength and fracture toughness of rocks, *Proc. YSRM 2017 & NDRMGE 2017*, Jeju, Korea.
- Paris, P.C., and F. Erdogan, 1963, A critical analysis of crack propagation laws. *J. Basic Engineering* 85, 528-534.
- Swanson, P.L., 1984, Sub critical crack growth and other time and environment-dependent behavior in crustal rocks. *J. Geophys. Res.* 89, 8,015-8,036.